干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

利用树木年轮重建阿勒泰地区1572—2014年初夏平均温度

牛军强[1,2,3]， 袁玉江[2]， 张同文[2]， 陈 峰[4]， 张瑞波[2]， 尚华明[2]， 姜盛夏[2]

（1. 新疆师范大学学报编辑部，新疆 乌鲁木齐 830017；2. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所，中国气象局树木年轮理化研究重点开放实验室，新疆树木年轮生态实验室，新疆 乌鲁木齐 830002；3. 新疆师范大学地理科学与旅游学院，新疆 乌鲁木齐 830054；4. 云南大学国际河流与生态安全研究院，云南 昆明 650504）

摘 要：利用阿勒泰地区3个高海拔西伯利亚落叶松（*Larix sibirica*）采样点的树轮样本，建立树轮宽度区域标准化年表（DKH）。通过相关普查发现，DKH年表与阿勒泰地区7个气象站当年6月平均温度显著相关，相关系数为0.705（P<0.00001），表明6月平均温度是影响树木年轮径向生长的主要气候限制因子。用DKH年表可较好地重建该地区1572—2014年共443 a的初夏平均温度，解释方差达49.6%，经验证表明温度重建序列是可信的。温度变化特征分析表明：重建初夏温度经历了10个偏暖和9个偏冷阶段，其中1605—1622年和1682—1723年分别是最暖和最冷的阶段，1875—1913年和1753—1804年分别是持续时间最长的偏暖和偏冷阶段。存在2.37~2.39 a、2.19 a的显著周期（P<0.05）和73.50 a、14.00 a、7.30 a、2.29 a、2.21 a的较显著周期（P<0.10）。在1684年、1719年前后均出现了由冷转暖的突变。空间相关分析表明文章重建的温度序列对阿勒泰地区温度具有较好的空间代表性。本研究重建的初夏温度序列与阿勒泰西部5—9月平均温度和阿尔泰山南坡温度序列相比较，具有较好的一致性。

关 键 词：阿勒泰地区；西伯利亚落叶松；区域标准化年表；平均温度变化

文章编号：

历史气候变化研究中，树木年轮以其独特优势被广泛应用[1]。高海拔、高纬度地区及干旱半干旱地区因气候要素对树木径向生长有重要作用而成为树木年轮气候研究的重点区域。自20世纪80年代以来，国内外树木年轮学家开展了丰富的树木年轮气候学研究。李江风等[2]研究了阿尔泰山南坡森林上限和下限110个采样点树木年轮年表在高频和低频信息含量变化，指出年轮指数序列和太阳黑子活动序列有相关性。邵雪梅等[3]利用川西地区云杉树轮宽度资料重建了研究区过去345 a冬季平均最低气温距平。段建平等[4]利用青藏高原东部的冷杉树轮晚材密度资料重建了贡嘎山区公元1837年以来8—9月温度变化。朱海峰等[5]利用祁连山区森林上限祁连圆柏树轮样本，揭示研究区树木生长的主要限制性因子，根据气候因子与年轮资料良好的相关性重建了过去1000 a来上年9月—当年4月平均温度。喻树龙等[6]根据单相关普查方法利用川西高原14个采样点，分析了研究区树轮宽度场和最低气温场的第一、第三特征向量有较好相关性，并重建了该研究区1787—2005年6—7月最低气温序列和平均气温序列。张瑞波等[7]用树轮图像分析法建立宽度年表和树轮灰度年表，分析并重建了乌孙山过去324 a的4—5月最低气温。目前开展的树木年轮气候与水文学研究也主要围绕小范围和局部区域[8-12]。本研究利用采自阿尔泰山森林上树线3个采样点的西伯利亚落叶松树轮宽度资料，构建区域

收稿日期：2020-06-22； **修订日期**：2020-10-02

基金项目：新疆维吾尔自治区重点实验室开放课题（2018D04028）；国家自然科学基金（41975095）；天山青年计划-杰出青年科技人才（2019Q007）；第二次青藏高原综合科学考察研究子专题（2019QZKK010206）；中国公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目（IDM201202，IDM2018004）

作者简介：牛军强（1987-），男，编辑，硕士研究生，主要从事树木年轮气候学研究. E-mail: niujq01@163.com

通讯作者：袁玉江（1955-），男，研究员，主要从事气候与环境、年轮气候与年轮水文应用气候研究. E-mail: yuanyuj5502@sina.com

树轮宽度年表，试图重建研究区温度变化并分析重建气候序列的变化特征，了解和掌握该区域历史气候变化事实、规律、特征，可为气候变化预测和经济发展预估工作提供依据[13]，对农牧业生产安排具有借鉴和指导意义。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

阿尔泰山全长2100 km，位于中国、哈萨克斯坦、俄罗斯和蒙古交界段，呈西北—东南走向横亘于亚洲中部[14]。阿尔泰山原始森林资源丰富，树种繁多。西伯利亚落叶松(*Larix Sibrica*)在海拔1300~2600 m范围内广泛分布，其生理特点是耐干旱、严寒，多在5月发芽开始生长，6—7月为速生期，9月开始落叶进入休眠期[15]。该树种在我国仅分布在新疆阿尔泰山南坡和天山东部地区。根据资料显示该区域降水主要来源于大西洋西风环流及北冰洋穿越山隘的部分气流带来的水汽，由于地形抬升作用，山区降水较为丰富，降水分布呈西北向东南递减的趋势[16]，温度随着降水的变化也因地而异。

1.2 气象数据

文章中气象资料选用于哈巴河(48°03′N，86°21′E，532.6 m，1961—2014年)、布尔津(86°52′E，47°42′N，473.9 m，1961—2014年)、阿勒泰(88°05′E，47°44′N，737.7 m，1954—2014)、富蕴(89°31′E，46°59′N，810.5 m，1962—2014)、青河(90°23′E，46°40′N，1218.2 m，1958—2014)、福海(87°26′E，47°05′N，523.5 m，1958—2014)、吉木乃(85°51′E，47°29′N，1019.5 m，1961—2014)7个气象站平均气候要素资料，7个气象站平均的气候要素值代表研究区气候要素值，因各气象站存在着不同程度的观测数据缺失，故选择公共时段为1962—2014年。经计算，距离采样点最近的阿勒泰气象站多年平均降水量为191.3 mm，多年平均温度为4.5 ℃。因气候因子对树木生长影响存在滞后效应，故利用相关函数的方法，将7个气象站1962—2014年逐月气候要素(平均温度、平均降水量)按照上年7月—当年9月的顺序排列组合，与区域标准化年表(DKH)进行单相关普查，分析西伯利亚落叶松径向生长与气候因子之间的响应。

1.3 样本采集和年表建立

我们严格按照树木年轮学基本原理[17]，2014年8月在阿勒泰地区的阿勒泰林场、福海林场选取了3个高海拔森林上树线采样点进行树木年轮样本采集(采样点概况见表1)，采样时我们尽可能避开了受火灾等各种外界因素干扰和受病虫害影响的树木，且采样点树木郁闭度较低，树间距多在5~10 m以上。共采集西伯利亚落叶松79棵，树芯261个。

样本预处理在中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所树木年轮理化研究重点开放实验室按树木年轮学基本原理和研究步骤[18-19]完成，将样本干燥、粘贴固定、磨光之后测量轮宽，并使用TT程序的折线图对比法进行交叉定年，采用国际通用的COFECHA程序[20]进行交叉定年质量控制。交叉定年检验完成后，由国际年轮库ARSTAN程序[21]完成树轮年表的研制，最终得到标准化年表(STD)、差值年表(RES)、自回归标准化年表(ARS)等9个树木年轮宽度年表[22]。本文选用标准化年表(STD)进行分析，由于各年表的互相关系数较高(表2)，因此我们将DDN、KLH和HSN 3个采样点的宽度序列放在一起重新交叉定年，并用前述年表建立方法，将3个单点年表合成为一个森林上树线西伯利亚落叶松区域标准化年表(DKH)，图1为区域年表的树轮宽度指数曲线。

表3显示树轮宽度区域标准化年表的统计特征，根据统计表可见，该区域年表的平均敏感度为0.181，一阶自相关为0.358，这表明气候因子对树轮宽度生长影响有明显滞后效应。较高的样本总体代表性，表明不同树木之间的树轮宽度变化具有较好的一致性。DKH年表序列的长度为493 a

表1 阿勒泰地区树轮采样点概况

Tab. 1 General situation of the sampling sites in Altay Prefecture

采样点名称	北纬/N	东经/E	海拔/m	坡向	坡度/°	最大树龄/a	样本量(株/树芯)
大东沟南(DDN)	48°11′	88°14′	2219	SSW	25°	337	24/78
喀拉哈依萨依(KLH)	47°55′	88°30′	2299	NW	23°	493	26/87
红山嘴南(HSN)	48°03′	88°55′	2403	NEE	17°	477	29/96

表2　阿勒泰地区3个树木年轮年表相关系数

Tab. 2　Correlation coefficients between the three tree-ring chronologies in the Altay Prefecture

年表	DDN	KLH	HSN
大东沟南(DDN)	1	0.594*	0.549*
喀拉哈依萨依(KLH)	0.594*	1	0.602*
红山嘴南(HSN)	0.549*	0.602*	1

注：*代表相关系数超过0.000001的显著水平，n=144。

(1522—2014年)，本文选取0.85为子样本信号强度(SSS)的阈限[23]，可靠年表序列长度为443 a (1572—2014年)，故该序列从1572年起可用于气候重建。

2　结果与分析

2.1　树木年轮径向生长与气候要素的相关关系

为了分析西伯利亚落叶松树木年轮径向生长与气候要素之间响应，将气象资料按照规范方法排列组合，之后再与树轮宽度区域标准化年表(DKH)进行单相关普查，结果如图2所示。

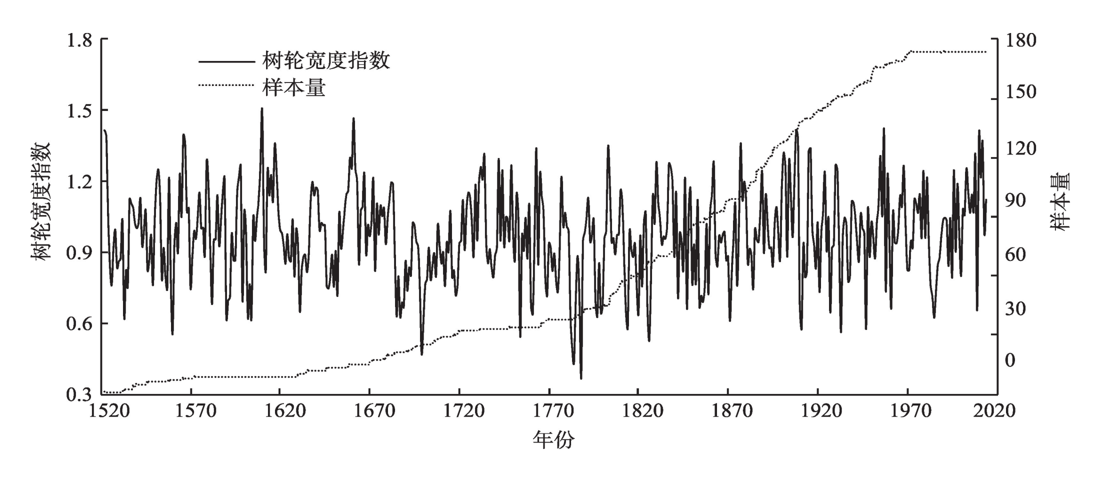


图1　区域标准化年表(DKH)树轮宽度指数和样本量

Fig. 1　Tree-ring width indices of the regional standardized chronology (DKH) and the amount of samples

表3　树轮宽度区域标准化年表(DKH)统计特征

Tab. 3　Statistical features of tree-ring width standardized chronology (DKH)

统计量	DKH年表
平均敏感度	0.181
标准差	0.193
一阶自相关	0.358
所有序列相关系数	0.370
信噪比	80.527
样本总体代表性	98.8
子样本信号强度(SSS)>0.85的起始年	1572

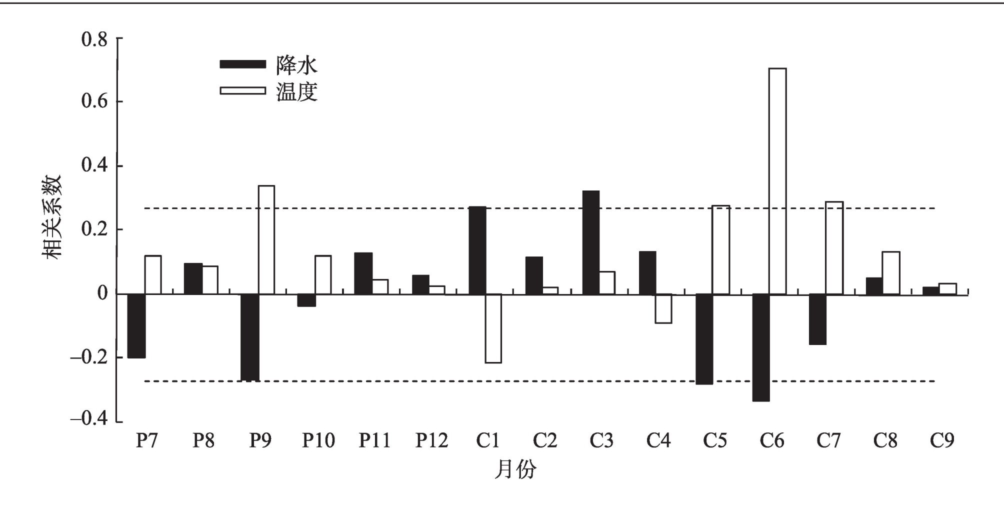
2.2　重建方程的建立和检验

根据前文的分析，将树轮宽度区域标准化年表(DKH)作为自变量，阿勒泰地区7个气象站当年6月平均气温的平均值作为因变量，利用线性回归模型建立重建方程：

$$T_{6,t}=15.13779+4.87729\times DKH_t \qquad (1)$$

式中：$T_{6,t}$是该地区7个气象站6月平均温度值；DKH_t是西伯利亚落叶松树轮宽度区域标准化年表；t是当年，t+1是次年。该重建方程的相关系数r为0.705，$F_{(1,51)}$=50.279，超过了0.00001的极显著性水平。该重建方程的方差解释量(R^2)达49.6%，表明重建结果可信。根据图3可以看出该区域初夏(6月)平均温度重建值与实测值变化趋势、幅度一致性较好，说明可用该重建方程重建研究区1572—2014年初夏(6月)平均温度。

重建方程的稳定性检验是决定重建值在校准期以外是否可信的重要一环。文中采用国际年轮研究中常用的逐一剔除法(Leave-one-out)[24]对(1)式进行交叉检验。重建方程交叉检验统计量见表4，原序列符号检验和一阶差符号检验均超过了0.01的显著性水平，说明温度重建序列与实测序列在高低频变化上具有较好的一致性。在树木年轮研究中一般认为误差缩减值(RE)为正值时，气候估计值能较好地通过检验，本文中RE值为0.459，表明该重建方程稳定，并且重建值可信。乘积平均数(T)为3.233，超过了0.01的显著性水平。综上，各统计量表明利用上述重建方程重建温度具有较高的可信度。



注:P7—P12表示上年7—12月,C1—C9表示当年1—9月,平行虚线代表0.05的显著水平值。

图2 区域标准化年表(DKH)与7站平均气象数据的相关关系

Fig. 2 Coefficients between the regional standardized chronology (DKH) and the average meteorology data of the seven stations

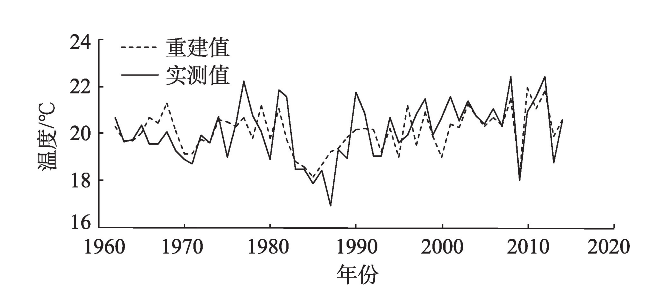


图3 阿勒泰地区6月平均温度实测值与重建值对比

Fig. 3 Comparison between the observed and reconstructed mean temperature of June in the Altay Prefecture

表4 阿勒泰地区6月平均温度重建方程和交叉检验统计量

Tab. 4 Statistical parameters of the reconstruction function and cross-validation of June in the Altay Prefecture

时段	原序列符号检验	一阶差符号检验	误差缩减值(RE)	乘积平均数(T)
1962—2014年	40(35*,37**)	38(34*,36**)	0.459	3.233

注:*表示超过0.05的显著性水平所需同号数量;**表示超过0.01的显著性水平所需同号数量。

2.3 温度重建序列的特征分析

通过(1)式,重建了研究区过去443 a(1572—2014年)来6月平均温度(图4)。为了解重建历史气候序列的冷暖变化特征,对重建历史气候序列进行了11 a滑动平均后,发现经历了10个偏暖阶段和9个偏冷阶段(表5)。其中,最暖的阶段为1605—1622年,比平均值偏高0.55 ℃;最冷的阶段为1682—1723年,比平均值偏低0.54 ℃;持续时间最长的偏暖阶段是1875—1913年,持续了39 a,持续时

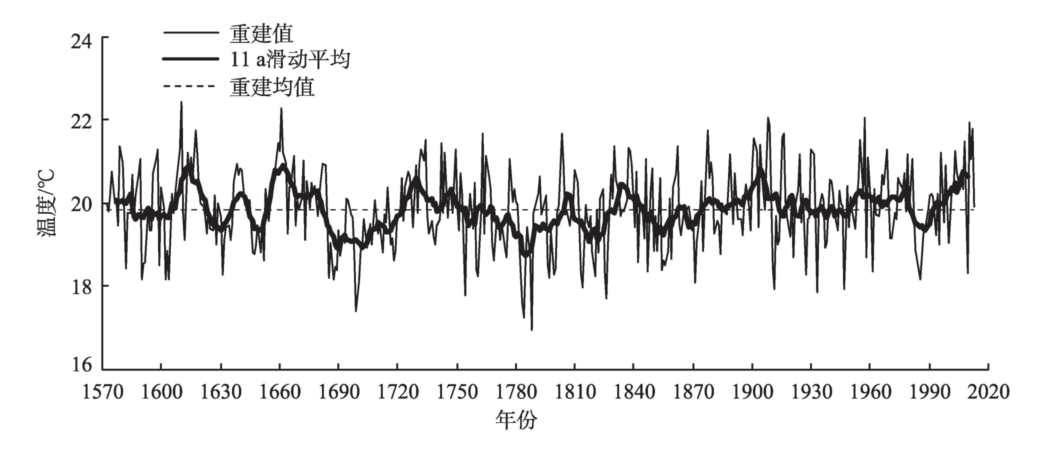


图4 阿勒泰地区1572—2014年6月平均温度重建序列、11 a滑动平均曲线和均值(19.86 ℃)线

Fig. 4 Average temperature reconstruction series on the current June, 11-year moving average, and the long-term mean (19.86 ℃) in the Altay Prefecture during 1572—2014

表5 过去443 a来重建温度序列的冷暖变化阶段

Tab. 5 Warm-cold periods of reconstruction temperature series over the past 443 a

偏暖阶段	年数/a	平均距平/℃	偏冷阶段	年数/a	平均距平/℃
1577—1585年	9	0.19	1586—1604年	19	0.16
1605—1622年	18	0.55	1623—1635年	13	0.29
1636—1644年	9	0.23	1645—1653年	9	0.35
1654—1681年	28	0.53	1682—1723年	42	0.54
1724—1752年	29	0.29	1753—1804年	52	0.37
1805—1808年	4	0.26	1809—1830年	22	0.39
1831—1844年	14	0.32	1845—1874年	30	0.25
1875—1913年	39	0.29	1929—1938年	10	0.08
1950—1980年	31	0.25	1981—1992年	12	0.31
1993—2009年	17	0.45			

间最长的偏冷阶段是1753—1804年，持续了52 a。

采用功率谱[25]方法对重建序列进行周期分析，通过计算分析，当年6月平均温度存在多个周期，以2.37~2.39 a、2.19 a的周期最为显著，均超过了0.05的显著性水平；此外73.5 a、14.0 a、7.3 a、2.29 a、2.21 a为较显著周期，超过了0.10的显著性水平。其中，2 a左右的周期反映了与海气间相互耦合振荡有关的“准两年脉动”[26-27]。

文章采用滑动T检验[28]方法对重建的温度序列进行突变检验，以α=0.005作为判别突变的显著水平，滑动步长分别取40 a、35 a、30 a、25 a和20 a进行比较，通过检验可知阿勒泰地区当年6月平均温度在1684年(稳定突变年份)、1719年(一般突变年份)前后均出现了由冷转暖的突变。

3 讨 论

3.1 树木径向生长与气候因子相关关系

从图2可以看出，该地区树木径向生长与当年3月降水呈显著正相关，与当年5、6月降水呈显著负相关，超过了0.05的显著性水平；与上年9月和当年5—7月的温度呈显著正相关，超过了0.05的显著性水平。当年3月降水与树轮径向生长呈正相关可能是因为当年3月积累了丰富的营养物质，有利于树木当年春材生长，径向生长形成较宽年轮。当年5、6月是春材形成期，又由于降雨通常伴随冷空气入侵、积云量增多和太阳辐射减弱，致使温度下降，一定程度上不利于树木进行光合作用，可能形成较窄年轮。而上年9月温度呈显著正相关可做如下解释：上年9月是上年树木生长季末期，通过生长季积累，树体内营养物质净积累量增加，导致树木生长较快，形成偏宽年轮。当年5—7月，尤其6月温度其相关系数为0.705，超过了0.001的极显著性水平。由于阿尔泰山西伯利亚落叶松生长季是5—9月，6月为速生期，这一时段上树线降水较充沛，在水分充分满足的条件下，温度越高，越有利于光合作用和形成层细胞分裂，形成偏宽年轮。反之，若是温度较低，则会降低光合作用效率，形成偏窄年轮。因此，阿尔泰山西伯利亚落叶松树轮径向生长与6月平均温度呈显著正相关具有明确的树木生理学意义[29]。在阿尔泰山北坡、南坡及川西高原[30-32]等地区都发现了树轮径向生长与6月温度的显著正相关关系。

3.2 空间代表性分析

为了探索本文重建序列对温度变化的空间代表性，我们利用Climate research unite (CRU TS3.23, 0.5°×0.5°)格点数据中1950—2014年6月平均温度数据与同时期7个气象站重建值进行空间代表性相关分析。结果表明，本文重建的阿勒泰地区初夏(6月)温度序列与CRU格点数据空间相关场的分布比较一致。中国新疆北部的阿勒泰地区、东部的哈密地区、吐鲁番地区、蒙古西部、哈萨克斯坦东北部、俄罗斯西西伯利亚南部相关性最好(r>0.6)。中国新疆天山以北、哈萨克斯坦东部、俄罗斯西西伯利亚南部及蒙古西部大范围地区也有较好的代表性(r>0.5)。外围地区相关系数也超过了0.3。这一空间分析的结果充分说明本文重建的7个气象站6月平均温度对大范围地区的温度变化具有很好的代表性。

3.3 与其他重建记录对比

我们将阿勒泰西部5—9月平均温度序列[12]以

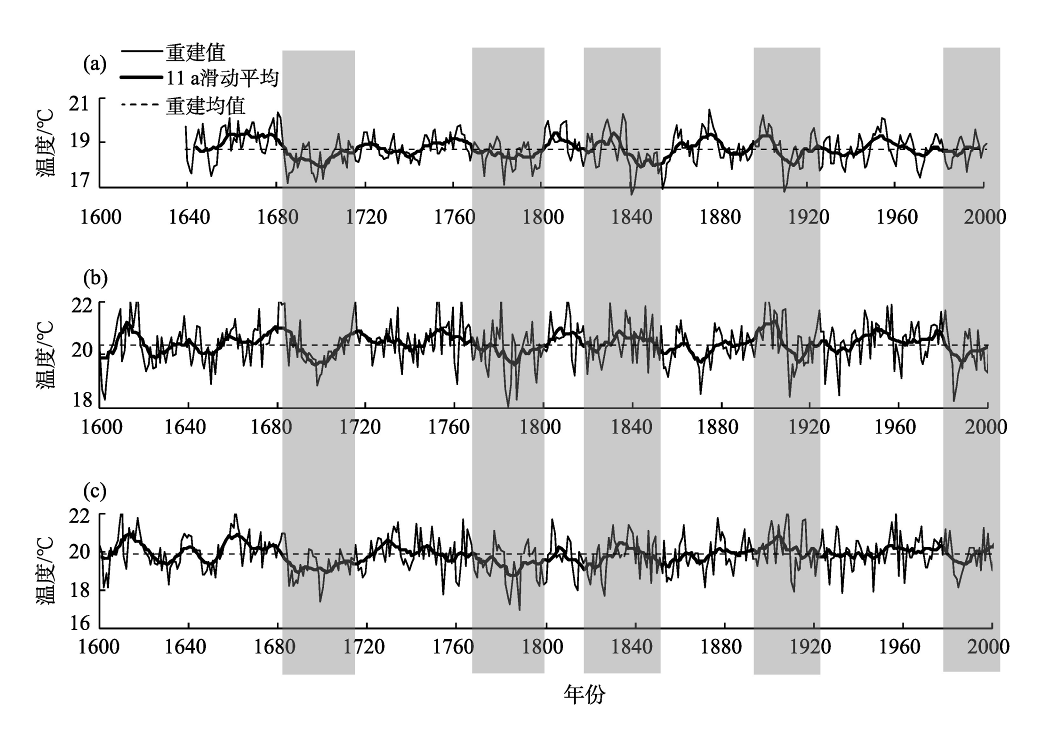
及阿尔泰山南坡436 a以来6月温度变化序列[33]与本文重建的温度序列进行了对比分析(图5)。对比结果表明,本文重建的温度序列与其他2条温度序列表现的温度变化趋势大致相同,冷暖阶段也有很好的对应。其中与尚华明重建的阿勒泰山南坡温度序列一致性尤为好。文中冷暖变化阶段与尚华明[33-34]重建温度序列中的1586—1604年偏冷、1654—1681年偏暖、1682—1723年偏冷、1866—1874年偏冷、1875—1913年偏暖、1950—1980年偏暖年、1981—1992年偏冷有很好的对应,另外与张同文[14]阿勒泰西部重建温度序列中的1654—1681年偏暖、1769—1804年偏冷、1845—1862年偏冷等冷暖阶段也基本一致。但是每条温度重建序列之间仍有一些冷暖变化差异之处,这可能是因为重建时所选取年表不同及采样点具体生长环境差异而导致出现偏差[35]。

4 结 论

(1) 利用采自阿勒泰地区3个高海拔森林上树线西伯利亚落叶松建立树木年轮宽度区域标准化年表(DKH)。通过相关分析发现,阿勒泰地区当年6月平均温度与树木年轮宽度DKH年表具有良好的相关性,相关系数达到0.705,说明6月平均温度是影响西伯利亚落叶松树木年轮当年生长的主要限制因子,基于树木年轮宽度DKH年表序列重建了阿勒泰地区过去443 a(1572—2014年)初夏(6月)温度序列。重建序列方程方差解释量达49.6%,重建方程是稳定、可靠的。

(2) 通过分析发现,在过去的443 a阿勒泰地区$T_{6,t}$重建温度序列先后经历了10个偏暖阶段和9个偏冷阶段。偏暖的阶段持续为:1577—1585年、1605—1622年、1636—1644年、1654—1681年、1724—1752年、1805—1808年、1831—1844年、1875—1913年、1950—1980年和1993—2009年;偏冷的阶段持续为:1586—1604年、1623—1635年、1645—1653年、1682—1723年、1753—1804年、1809—1830年、1845—1874年、1929—1938年和1981—1992年。其中1605—1622年和1682—1723年分别是最暖和最冷的阶段,1875—1913年和1753—1804年分别是持续时间最长的偏暖(39 a)和偏冷(52 a)阶段。

(3) 通过功率谱分析发现,阿勒泰地区的重建温度序列存在2.37~2.39 a、2.19 a的显著周期($P<$



注:(a) 张同文[11]等重建的阿勒泰西部5—9月平均气温序列;(b) 尚华明等[3]重建的阿勒泰436 a来6月温度变化;(c) 本文重建的阿勒泰地区初夏平均温度序列。灰色带表示与其他重建序列对比冷暖阶段变化趋势相似部分。

图5 本文重建的温度序列与其他温度重建序列的对比

Fig. 5 Comparison between the mean June temperature reconstruction in this study with other tree-ring based temperature change records

0.05）和73.5 a、14.0 a、7.3 a、2.29 a、2.21 a的较显著周期（$P<0.10$），2 a左右的周期变化可能与海气间相互耦合振荡"准两年脉动"有关，即受赤道地区平流层的26~30个月为周期的西向风和东向风之间的不断转换形成的准2 a和准3 a周期振荡。重建序列的周期变化体现出赤道平流层西向风和东向风之间的不断转换可能对阿勒泰地区冷暖变化产生了重要的影响。

（4）文中温度重建序列与另外2条比较典型的温度重建序列均能反映出1586—1604年偏冷、1654—1681年偏暖、1682—1723年偏冷、1866—1874年偏冷、1875—1913年偏暖、1950—1980年偏暖、1981—1992年偏冷和1654—1681年偏暖、1769—1804年偏冷、1845—1862年偏冷等冷暖阶段，然而重建序列与所用的对比序列之间仍有一些冷暖变化差异之处，这可能是因为重建时所选取年表不同及采样点具体生长环境差异所致。同时通过原序列符号检验和一阶差符号检验，说明重建序列与实测序列在高低频变化上具有较好的一致性。利用空间相关分析表明，文章重建的1572—2014年7个气象站6月平均温度的重建值对整个阿勒泰地区6月温度也具有较好的空间代表性。

致谢：衷心感谢本文资助项目，阿尔泰山国有林管理局及林场工作人员在野外采样中给予的大力帮助以及专家对本文提出的宝贵意见。

参考文献（References）

[1] Lara A, Villalba R. A 3620-year temperature record from *Fitzroya cupressoides* tree rings in southern South America[J]. Science, 1993 (60): 1104-1106.

[2] 李江风, 袁玉江, 张治家, 等. 阿尔泰山南坡树木年表的气候信息量[J]. 新疆气象, 1987(12): 1-8. [Li Jiangfeng, Yuan Yujiang, Zhang Zhijia, et al. Climatic in formation in tree chronology on the southern slope of Altay Mountain[J]. Xinjiang Meteorological, 1987 (12): 1-8.]

[3] 邵雪梅, 范金梅. 树轮宽资料所指示的川西过去气候变化[J]. 第四纪研究, 1999, 19(1): 81-89. [Shao Xuemei, Fan Jinmei. Past climate on west Sichuan Plateau as reconstructed from ring-widths of dragon spruce[J]. Quaternary Sciences, 1999, 19(1): 81-89.]

[4] 段建平, 王丽丽, 李论, 等. 树轮最大密度记录的贡嘎山区公元1837年以来的温度变化[J]. 科学通报, 2010, 55(11): 1036-1042. [Duan Jianping, Wang Lili, Li Lun, et al. Temperature variability since A. D. 1837 inferred from tree-ring maximum density of *Abies fabric* in Gongga Mountains, China[J]. Chinese Sci Bull, 2010, 55(11): 1036-1042.]

[5] 朱海峰, 郑永宏, 邵雪梅, 等. 树木年轮记录的青海乌兰地区近千年温度变化[J]. 科学通报, 2008, 53(15): 1835-1841. [Zhu Haifeng, Zheng Yonghong, Shao Xuemei, et al. Temperature changes recorded by tree-rings in the last thousand years in Wulan, Qinghai Province[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(15): 1835-1841.]

[6] 喻树龙, 袁玉江, 魏文寿, 等. 川西高原6—7月最低气温场重建研究[J]. 中国沙漠, 2012, 32(4): 1010-1016. [Yu Shulong, Yuan Yujiang, Wei Wenshou, et al. Reconstruction of minimum temperature field in June to July during 1787—2005 in the west Sichuan Plateau[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(4): 1010-1016.]

[7] 张瑞波, 袁玉江, 魏文寿, 等. 用树轮灰度重建乌孙山北坡4—5月平均最低气温[J]. . 中国沙漠, 2008, 28(5): 848-854. [Zhang Ruibo, Yuan Yujiang, Wei Wenshou, et al. Mean minimum temperature series of April to May reconstructed by tree-ring gray chronology in northern slope of Wusun Mountains, north Xinjiang[J]. Journal of Desert Research, 2008, 28(5): 848-854.]

[8] Panyushkina I P, Ovtchinnikov D V, Adamenko M F. Mixed response of variability in larch tree-ring chronologies from upper tree lines of the Russia Altay[J]. Tree-Ring Research, 2005, 61(1): 33-42.

[9] Myglan V S, Oidupaa O C, Kirdyanov A V, et al. 1929 year tree-ring chronology for the Altai-Sayan region (western Tuva)[J]. Archaeology Ethnology & Anthropology of Eurasia, 2008, 36(4): 25-31.

[10] 张同文, 袁玉江, 喻树龙, 等. 树木年轮重建阿勒泰西部1481—2004年6—9月降水量序列[J]. 冰川冻土, 2008, 30(4): 659-667. [Zhang Tongwen, Yuan Yujiang, Yu Shulong, et al. June to September precipitation series of 1481—2004 reconstructed from tree-ring in the western region of Altay Prefecture, Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(4): 659-667.]

[11] 胡义成, 袁玉江, 魏文寿, 等. 用树木年轮重建阿勒泰东部6—7月平均温度序列[J]. 中国沙漠, 2012, 32(4): 1003-1009. [Hu Yicheng, Yuan Yujiang, Wei Wenshou, et al. Tree-ring reconstruction of mean June-July temperature during 1613—2006 in east Altay, Xinjiang of China[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(4): 1003-1009.]

[12] 张同文, 袁玉江, 喻树龙, 等. 用树木年轮重建阿勒泰西部5—9月365年来的月平均气温序列[J]. 干旱区研究, 2008, 25(2): 288-294. [Zhang Tongwen, Yuan Yujiang, Yu Shulong, et al. Reconstructed mean temperature series from May to September with tree-ring in the western region of Altay near the recent 365 years [J]. Arid Zone Research, 2008, 25(2): 288-294.]

[13] 尚华明, 魏文寿, 袁玉江, 等. 哈萨克斯坦东北部310年来初夏温度变化的树轮记录[J]. 山地学报, 2011, 29(4): 402-408. [Shang Huaming, Wei Wenshou, Yuan Yujiang, et al. Early summer temperature history in northeastern Kazakhstan during the last 310 years recorded by tree rings[J]. Journal of Mountain Sci-

ence, 2011, 29(4): 402−408.]

[14] Schwikowski M, Eichler A, Kalugin I, et al. Past climate variability in the Altay[J]. PAGES News, 2009, 17(1): 44−45.

[15] 袁玉江, Esper Jan, 魏文寿, 等. 新疆天山西部三个云杉上树线树轮最大密度年表的研制,相关性及其气候信号分析[J]. 干旱区地理, 2008, 31(4): 560−566. [Yuan Yujiang, Esper Jan, Wei Wenshou, et al. Development, correlation and climate signal analysis of three spruce chronologies of tree-ring maximum density from upper tree line in the western Tianshan Mountains of Xinjiang[J]. Arid Land Geograohy, 2008, 31(4): 560−566.]

[16] 努尔兰·哈再孜. 阿勒泰地区河流水文特征[J]. 水文, 2001, 21(4): 53−55. [Nuerlan Hazaizi. Hydrologic characteristics of Altay Prefecture[J]. Journal of China Hydrology, 2001, 21(4): 53−55.]

[17] 吴祥定. 树木年轮与气候变化[M]. 北京: 气象出版社, 1990: 64−80. [Wu Xiangding. Tree rings and climate change[M]. Beijing: Meteorological Press, 1990: 64−80.]

[18] Stokes M A, Smiley T L. An introduction to tree-ring dating[M]. Tucson: University of Arizona Press, 1996: 1−175.

[19] 袁玉江, 李江风. 新疆伊犁地区树轮年表特征初探[J]. 干旱区地理, 1993, 16(3): 49−50. [Yuan Yujiang, Li Jiangfeng. Preliminary study on the features of tree-ring chronology in Yili area of Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 1993, 16(3): 49−50.]

[20] Homes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement[J]. Tree Ring Bulletin, 1983(43): 69−78.

[21] Cook E R. A time series analysis approach to tree-ring standardization[D]. Tucson: The University of Arizona Press, 1985: 1−170.

[22] 周文盛, 李江风, 张治家, 等. 阿尔泰山南坡树木年轮年表研制中的几个问题[C]//李江风. 新疆年轮气候年轮水文研究. 北京: 气象出版社, 1989: 9−17. [Zhou Wensheng, Li Jiangfeng, Zhang Zhijia, et al. Some problems in developing the tree-ring chronologies in the south slope of the Altay Mountain[C]//Li Jiangfeng. Study of Tree-ring Climatology and Tree-ring Hydrology in Xinjiang. Beijing: Meteorological Press, 1989: 9−17.]

[23] Wigley T M L, Briffa K R, Jones P D. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology[J]. Climatology Applied Meteorology, 1984(23): 201−213.

[24] 袁玉江, 叶玮, 董光荣. 天山西部伊犁地区314 a降水的重建与分析[J]. 冰川冻土, 2000, 22(2): 121−127. [Yuan Yujiang, Ye Wei, Dong Guangrong. Reconstruction and discussion of 314 a precipitation in Yili Prefecture, western Tianshan Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, 22(2): 121−127.]

[25] Brifaa K R, Osborna T J, Schweingruberb F H. Large-scaletem-perature inferences from tree rings: A review[J]. Global and Planetary Change, 2004, (40): 11−26.

[26] 钱维宏, 朱亚芬, 叶谦. 赤道东太平洋海温异常的年际和年代际变率[J]. 科学通报, 1998, 43(10): 1098−1102. [Qian Weihong, Zhu Yafen, Ye Qian. Interannual and interdecadal variability of sea surface temperature anomalies in the eastern Equatorial Pacific[J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(10): 1098−1102.]

[27] 黄小梅, 肖丁木, 秦宁生, 等. 利用树木年轮重建公元1639—2013年青南高原5—9月相对湿度变化[J]. 干旱区地理, 2018, 41(5): 1001−1008. [Huang Xiaomei, Xiao Dingmu, Qin Ningsheng, et al. Tree-ring based reconstruction of relative humidity from May to September in southern Qinghai Plateau during AD 1639—2013[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(5): 1001−1008.]

[28] 魏凤英, 曹鸿兴. 中国、北半球和全球的气温突变分析及趋势预测研究[J]. 大气科学, 1995, 19(2): 140−148. [Wei Fengying, Cao Hongxing. Detection of abrupt changes and trend prediction of the air temperature in China, the northern Hemisphere and the Globe[J]. Atmosphere Sciences, 1995, 19(2): 140−148.]

[29] 吴燕良, 甘淼, 于瑞德, 等. 基于树轮生理模型的雪岭云杉径向生长的模拟研究[J]. 干旱区地理, 2020, 43 (1): 64−71. [Wu Yanliang, Gan Miao, Yu Ruide, et al. Process-based modeling radial growth of *Picea schrenkiana* in the eastern Tianshan Mountains[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(1): 64−71.]

[30] Ovtchinnikov D, Adamenko M, Panushkina I. A 1105-year tree-ring chronology in Altai region and its application for reconstruction of summer temperatures[J]. Geolines, 2000(11): 121−122.

[31] 张瑞波, 尚华明, 魏文寿, 等. 树轮$\delta^{13}C$记录的阿勒泰地区近160 a夏季气温变化[J]. 沙漠与绿洲气象, 2014, 8(2): 34−40. [Zhang Ruibo, Shang Huaming, Wei Wenshou, et al. Summer temperature history in Altay during the last 160 years recorded by $\delta^{13}C$ in tree rings[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2014, 8(2): 34−40.]

[32] 邵雪梅, 范金梅. 树轮宽度资料所指示的川西过去气候变化[J]. 第四纪研究, 1999, 19(1): 81−89. [Shao Xuemei, Fan Jinmei. Past climate on west Sichuan Plateau as reconstructed from ring width of dragon spruce[J]. Quaternary Sciences, 1999, 19(1): 81−89.]

[33] 尚华明, 魏文寿, 袁玉江, 等. 树轮记录的阿勒泰436 a来6月温度变化[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(8): 116−121. [Shang Huaming, Wei Wenshou, Yuan Yujiang, et al. The mean June temperature history of 436 a in Altay reconstructed from tree ring[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(8): 116−121.]

[34] 尚华明, 魏文寿, 袁玉江, 等. 阿尔泰山南坡树轮宽度对气候变暖的响应[J]. 生态学报, 2010, 30(9): 2246−2253. [Shang Huaming, Wei Wenshou, Yuan Yujiang, et al. Response of tree ring width to recent climate change, south slope of Altay Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(9): 2246−2253.]

[35] 李金建, 邵雪梅, 李媛媛, 等. 树轮宽度记录的松潘地区年平均气温变化[J]. 科学通报, 2014, 59(15): 1446−1458. [Li Jinjian, Shao Xuemei, Li Yuanyuan, et al. Annual temperature recorded in tree-ring from Songpan region[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(15): 1446−1458.]

Reconstruction of early summer temperature during 1572—2014 from tree-rings in the Altay Prefecture

NIU Junqiang[1,2,3], YUAN Yujiang[2], ZHANG Tongwen[2], CHEN Feng[4], ZHANG Ruibo[2], SHANG Huaming[2], JIANG Shengxia[2]

(1. Editorial Department of Journal of Xinjiang Normal University, Urumqi 830017, Xinjiang, China; 2. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Key Laboratory of Tree-ring Physical and Chemical Research of China Meteorological Administration, Xinjiang Laboratory of Tree Ring Ecology, Urumqi 830002, Xinjiang, China; 3. College of Geography Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, Xinjiang, China; 4. Institute of International Rivers and Eco-security, Yunnan University, Kunming 650504, Yunnan, China)

Abstract: Dendroclimatology is one of the important methods for examining the past global climate changes. Here, the study area is the upper stream of China’s climate and weather, located on the Altay Mountains’ southern slope in northwestern China. Reconstructing the climatic variation series in this region is very important in recognizing the climatic variations on the Altay Mountains’ southern slope in the past. In the summer of 2014, the three tree-ring samples sites (trees of 79 and tree cores of 261) were collected for *Larix sibirica* from the upper tree line of forests at the midwestern Altay Mountains. We developed three kinds of tree-ring width chronologies by the ARSTAN program. In this study, we chose the regional tree-ring standard chronology (DKH) and used 7 meteorological station data close to the sampling site. Single correlation census showed that the correlation between the regional tree-ring chronology from the 7 meteorological stations and the average current June temperature is significant with the best single correlation coefficient of 0.705 (P<0.00001). In this study, we used the regional tree-ring standard chronology to reconstruct this region’s average June temperature since 1572 AD. The explained variance of the function was 49.6% (F=50.27948, P<0.00001). Many verifications showed that the reconstructed temperature series was reliable. After 11 a of reconstructed temperature series was calculated, in the past 443 a, we found the following: (1) 10 warm periods in 1577—1585, 1605—1622, 1636—1644, 1654—1681, 1724—1752, 1805—1808, 1831—1844, 1875—1913, 1950—1980, and 1993—2009; and (2) nine cold periods were found in 1586—1604, 1623—1635, 1645—1653, 1682—1723, 1753—1804, 1809—1830, 1845—1874, 1929—1938, and 1981—1992. The warmest period occurred in 1605—1622, and the coldest period occurred in 1682—1723. The 1875—1913 period was the most extended warm period, whereas the 1753—1804 period was the most prolonged cold period. Power spectrum analysis showed that there exist some significant change periods of 2.37–2.39 a and 2.19 a (P<0.05) and 73.50 a, 14.00 a, 7.30 a, and 2.29 a (P<0.10) in temperature. The cycle of 2.19 a may be related to the quasi-biennial oscillation. The moving t-test technique showed the abrupt change of temperature occurred in the 1684 and 1719 periods from cold to warm in this region. According to the spatial correlation analysis results, the temperature reconstructed series represents the early summer temperature changes in the Altay Prefecture. Our reconstructed mean June temperature series change trend, cold, and warm periods were consistent with the former reconstructed temperature series of the Altay Mountains western and south slopes.

Key words: Altay Prefecture; *Larix sibirica*; regional standardization chronology; average temperature change